

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平4-246906

(43) 公開日 平成4年(1992)9月2日

(51) Int.Cl. ⁵	識別記号	庁内整理番号	F I	技術表示箇所
H 0 3 H 17/00	B	8731-5 J		
G 0 6 F 15/18		8945-5 L		
G 0 6 G 7/60		7368-5 B		
G 1 1 B 20/22		7736-5 D		

審査請求 未請求 請求項の数 8 (全 13 頁)

(21) 出願番号 特願平3-31952

(22) 出願日 平成3年(1991)1月31日

(71) 出願人 000004329

日本ビクター株式会社

神奈川県横浜市神奈川区守屋町3丁目12番地

(72) 発明者 高橋 暹

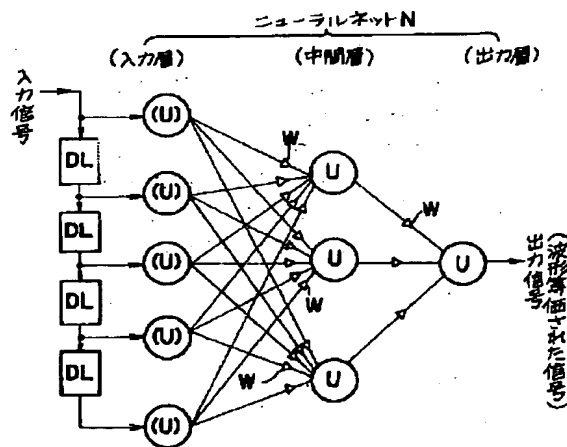
神奈川県横浜市神奈川区守屋町3丁目12番地 日本ビクター株式会社内

(54) 【発明の名称】 ニューラルネットによる波形等化装置及びその設計方法

(57) 【要約】

【構成】 伝送再生系からの劣化したデジタル信号を遅延させる手段DLと、非線形の入出力特性を有する複数の変換系Uが独立した重みWで結ばれたニューラルネットNによる波形等化である。時間的に前後させたデジタル信号を変換可能な重みを有するニューラルネットNに入力し、伝送再生系の特性に応じた重みを予め学習させる。学習結果に基づいて、固定の重みを有し、ニューラルネットNと等価な信号処理装置WEを構成し、伝送再生系からの劣化したデジタル信号をリアルタイムで波形等化して出力させる。

【効果】 ニューラルネットを利用することにより、簡易な構成で、かつ、高性能な波形等化装置が提供され、その設計方法も極めて容易で、かつ、確実である。



1

【特許請求の範囲】

【請求項1】伝送再生系からの劣化したデジタル信号を遅延させる手段と、非線形の入出力特性を有する複数の変換系が独立した固定の重みで結ばれ、かつ、この固定の重みはニューラルネットにより前記伝送再生系の特性に対して予め学習された重みである変換手段とからなり、時間的に前後させた前記デジタル信号を前記変換手段に入力し、前記伝送再生系の特性に応じて、前記劣化したデジタル信号を波形等化して出力するようにしたことを特徴とするニューラルネットによる波形等化装置。

【請求項2】伝送再生系からの劣化したデジタル信号を遅延させる手段と、非線形の入出力特性を有する複数の変換系が独立した固定の重みで結ばれた変換手段とからなり、前記伝送再生系からの劣化したデジタル信号を波形等化して出力する波形等化装置の設計方法であって、前記波形等化装置と等価で、かつ、非線形の入出力特性を有する複数の変換系が独立した可変の重みで結ばれたニューラルネットにより、前記伝送再生系の特性に応じた重みを可変学習させて、前記可変学習された重みをもとに前記変換手段の固定の重みを設計決定するようにしたことを特徴とするニューラルネットによる波形等化装置の設計方法。

【請求項3】前記ニューラルネットを層状にすると共に、このニューラルネットの出力層を構成する変換系では、前層から入力される複数の信号中に、極性の異なる信号が含まれるようにしたことを特徴とする請求項1記載のニューラルネットによる波形等化装置。

【請求項4】前記非線形の入出力特性を有する変換系として、非線形の特性を有する半導体素子を用いたことを特徴とする請求項1記載のニューラルネットによる波形等化装置。

【請求項5】前記非線形の入出力特性を有する変換系として、異なる線形特性を有する複数の入出力領域から構成された変換系を用いたことを特徴とする請求項1記載のニューラルネットによる波形等化装置。

【請求項6】前記伝送再生系の特性に応じた前記重みの学習に際して、教師信号としては、出力されるべきデジタル信号の2値と、この2値の中間の値とを用いたことを特徴とする請求項2記載のニューラルネットによる波形等化装置の設計方法。

【請求項7】前記伝送再生系の特性に応じた前記重みの学習に際して、前記伝送再生系から実際に再生されたデジタル信号の位相に同期するタイミングで学習するようにしたことを特徴とする請求項2記載のニューラルネットによる波形等化装置の設計方法。

【請求項8】非線形の入出力特性を有する複数の変換系が独立した重みで結ばれた結合体であり、被学習条件に対応した信号処理を実行するニューラルネットにおいて、学習及びこれに付随する学習中の信号処理については、可変の重みを有するニューラルネットに対して計算

2

機上のシミュレーション動作により実行して、被学習条件に対応した前記可変の重みを学習させ、学習後の所望の信号処理については、前記ニューラルネットと等価で、前記学習により学習された重みをもとに決定された固定の重みを有する実体的信号処理装置として構成して、リアルタイムで学習条件に応じた信号処理をするようにしたことを特徴とするニューラルネット。

【発明の詳細な説明】

【0001】

10 【産業上の利用分野】本発明は、デジタル信号を記録再生・伝送する際に生じた信号劣化を除去する波形等化手段に係り、特にニューラルネットを利用し、簡易な構成で、かつ、高性能な波形等化装置及びその設計方法を提供するものである。

【0002】

【従来の技術】近年、デジタル信号による記録再生（伝送）が盛んに利用されている。しかし、デジタル信号による場合でも、媒体（伝送系）自体への記録（伝送）はアナログ（信号）である。そして、磁気記録再生系ではピークシフトとして知られているように、信号波形が部分的に時間シフトして記録・再生されて劣化し、信号データである「0」「1」の判定を誤ることがある。また、光学記録再生系でも、レンズの収差などにより、信号の劣化（符号間干渉）が生じる。

【0003】このようなデジタル信号の劣化は、記録再生系（伝送系）などで頻繁に発生するものである。これに対して、従来では、図9に示すようなトランスバーサル形フィルタによる波形等化装置が用いられていた。再生装置からの入力信号は、遅延回路30a～30dにより遅延された後、異なる増幅係数を有するアンプ31a～31eで増幅され、加算回路32で加算出力されていた。しかし、このような波形等化装置では、十分な効果が得られなかった。

【0004】ここで、磁気記録再生系の信号劣化について説明すると以下の通りである。図10(A)～(E)は磁気記録再生系に発生する信号劣化の状態を示すものである。これはNRZ (Non Return to Zero) 符号を記録再生した場合を示している。

40 【0005】同図(A)のように理想的な電流で記録しても、実際に記録される磁化パターンは同図(B)のように劣化したものとなる。再生時には微分波形として再生されるから理想的な電流で記録した場合には同図(C)になり、波形の劣化はなくピークシフトも発生しない。

【0006】しかし、同図(D)のように劣化した信号を再生すると、同図(E)のように、ピークシフト Δt が生じた微分波形となってしまう。このように劣化していると、記録波形の反転（NRZ符号であるので、磁化反転が「1」を表わす）がどこで起きたのか分からなくなってしまう、正しい波形が再生できないこととなる。

3

すなわち、 t_2 と t_3 で反転しているにもかかわらず、 t_1 と t_4 で反転しているように判断されたり、あるいはレベルがこの部分で低いため、反転なしと判断されてしまう。逆にこの低いレベルを反転と見なすと、 t_6 だけであるべき反転が t_5 及び t_7 までも反転しているように、誤った判断をしてしまうことになる。

【0007】また、光学記録再生系では、もっと大きい信号の劣化が生じる。光学記録再生系においてはレンズに収差があり、この収差が全て信号の劣化（符号干渉）を生ずる原因となる。レンズの収差としては、「ザイデルの5収差」と呼ばれる5種類の収差があり、その中でも、非点収差・球面収差・コマ収差はデジタル信号に符号間の干渉を発生させ、これを劣化させる大きな原因となる。さらに、光ディスクの傾きによっても光学的収差が生じ、符号間の干渉が引起こされて、信号が劣化する。

【0008】図11(A)～(D)は、光学記録再生系に発生する信号劣化の状態を示すものである。ここでは $T_{\min} = 2T$ （最小ビットサイズがクロック周期の2倍）の場合を示している。同図(A)が原波形であって、注目すべき部分X、Yについて説明する。

【0009】部分Xでは左（時間的に前）に $2T$ （のデータ）があり、右に $6T$ （のデータ）がある。部分Yでは逆に左に $6T$ （のデータ）が右に $2T$ （のデータ）がある。光学記録再生はエネルギーによるものであり、磁気記録再生におけるN極S極と言ったものに相当する逆の要素を持たない。このため球面収差によってボケが発生すると、同図(B)のように大きな符号長である $6T$ （のデータ）の周辺が太る結果となり、 t_2 は t_1 にずれ、 t_3 は t_4 にずれてしまう。さらにコマ収差による劣化はひどい結果をもたらす。同図(C)はコマ収差がディスクの回転方向と逆の方向（逆）に発生した場合であり、同図(D)はコマ収差がディスクの回転方向（正）に発生した場合であり、原因によりずれ量が異なる。

【0010】このように光学記録再生系による読み取り、すなわち、光ディスクのような場合ではレンズ・光学系の収差は前述のように多く存在し、どの収差にどれほど起因して符号劣化が発生したか定量的には把握できないので、従来の波形等化装置ではほとんど対応できなかった。すなわち、符号の干渉程度（符号の劣化の程度）や劣化の原因によって異なる係数値（図9に示したアンプの増幅係数）が要求されるので一義的に定まらず、従来のような線形な波形等化装置では対応できなかった。

【0011】しかし、磁気記録再生系に発生した前記図10(D)及び(E)に示すような信号劣化の状態であっても、磁気記録再生系の特性やNRZ符号に熟知した経験者であれば正しく判断することができる。つまり、反転自身は必ずベアになっており、正の反転には必ず負

4

の反転が続く、正負正負と続く。したがって、 t_2 と t_3 について言えば、ここで短い期間で反転したと判断でき、この付近ではピークシフトによって実際よりも長い期間になっていることから、反転自身は t_1 、 t_4 でなく t_2 、 t_3 であると正しく判断できる。また、 t_5 、 t_6 、 t_7 はいずれも正でありベアになっていないことから、 t_6 で反転していることが判明する。

【0012】さらに、光学記録再生系に発生した前記図11(B)～(D)に示すような信号劣化の状態であっても、光学記録再生系の特性に熟知した経験者によれば正しく判断することができる。つまり、 $6T$ （のデータ）の傾きからコマ収差の方向とその量が分かり、その状態をもとにして正しい反転位置を知ることができる。

【0013】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、デジタル信号を記録再生・伝送する際に生じた信号劣化をリアルタイムで除去する場合に、上記したように、経験的・分析的にする方法では現実的解決策とはいえない。また、前述した従来の波形等化装置では十分な性能が得られず、その設計（例えば、伝送再生系に応じた増幅係数の決定）も容易ではなかった。

【0014】ところで、最近ではニューラルネットにより信号処理することが試みられている。ニューラルネットは、非線形の入出力特性を有する複数の変換系が独立した可変の重みで結ばれた結合体であり、学習により重みが可変されて構築されるものである。ニューラルネットでは、目的とする前向き伝達動作（フィードフォワード処理）と、バックプロパゲーションなどの学習動作（フィードバック処理）との動作処理がなされ、計算機上でのシミュレーション動作として実行されるのが一般的である。このため、ニューラルネットによる高速な処理動作やリアルタイムな信号処理は計算機の性能から不可能とされ、さらに、非線形の入出力特性を有する変換系を実際に構成するのも容易ではなかった。

【0015】このような状況の下では、ニューラルネットを利用して、上述した磁気記録再生系や光学記録再生系の特性を学習させ、伝送再生系からの劣化したデジタル信号をリアルタイムで波形等化して出力させることは、非現実的なものとされ、まったく考えられていなかった。

【0016】そこで、本発明は、非線形の入出力特性を有する複数の変換系が独立した重みで結ばれた結合体であるニューラルネットの機能と構成を、学習後の所望の処理機能である（すなわち目的とする）前向き伝達動作のための機能と、学習中のバックプロパゲーションなどの学習動作のための機能とに峻別して、その機能を実現するのに最適な構成を別々に提供し、これにより、ニューラルネットを利用して伝送再生系からの劣化したデジタル信号をリアルタイムで波形等化して出力できるようにしたものである。

5

【0017】つまり、バックプロパゲーションなどの学習動作（フィードバック処理）及びこれに付随する学習中の処理（フィードフォワード処理）は、計算機上のシミュレーション動作により実現して、複数の変換系間の重みを学習により可変決定する（ソフトウェア的実行）。この学習用の構成により、学習動作は効率的・高精度に行なわれて良い学習結果が得られる。一方、学習後の所望の処理機能である（目的とする）前向き伝達動作（フィードフォワード処理）は、オペアンプなどの汎用のアナログ部品で構成した実体的な信号処理装置（信号処理回路網）で構成し、かつ、複数の変換系間の重みは固定された重みとする（ハードウェア的実行）。この装置（回路網）に固定される重みは、前記学習により決定された可変の重みを利用する。この処理用の構成は、学習機能が不要なので、簡易であり、かつ、高速な処理が可能である。

【0018】この結果、ニューラルネットを利用して、上述した磁気記録再生系や光学記録再生系の特性を予め学習させ、伝送再生系からの劣化したデジタル信号をリアルタイムで波形等化して出力させることができることとなる。

【0019】

【課題を解決するための手段】本発明は、伝送再生系からの劣化したデジタル信号を遅延させる手段と、非線形の入出力特性を有する複数の変換系が独立した固定の重みで結ばれ、かつ、この固定の重みはニューラルネットにより前記伝送再生系の特性に対して予め学習された重みである変換手段とからなり、時間的に前後させた前記デジタル信号を前記変換手段に入力し、前記伝送再生系の特性に応じて、前記劣化したデジタル信号を波形等化して出力するようにしたニューラルネットによる波形等化装置を提供するものである。

【0020】さらに、本発明は、伝送再生系からの劣化したデジタル信号を遅延させる手段と、非線形の入出力特性を有する複数の変換系が独立した固定の重みで結ばれた変換手段とからなり、前記伝送再生系からの劣化したデジタル信号を波形等化して出力する波形等化装置の設計方法であって、前記波形等化装置と等価で、かつ、非線形の入出力特性を有する複数の変換系が独立した可変の重みで結ばれたニューラルネットにより、前記伝送再生系の特性に応じた前記重みを可変学習させて、前記可変学習された重みをもとに前記変換手段の固定の重みを設計決定するようにしたニューラルネットによる波形等化装置の設計方法を提供するものである。

【0021】また、本発明は、非線形の入出力特性を有する複数の変換系が独立した重みで結ばれた結合体であり、被学習条件に対応した信号処理をするニューラルネットにおいて、学習及びこれに付随する学習中の信号処理については、可変の重みを有するニューラルネットに対して計算機上のシミュレーション動作により実行して、

6

被学習条件に対応した前記可変の重みを学習させ、学習後の所望の信号処理については、前記ニューラルネットと等価で、前記学習により学習された重みをもとに決定された固定の重みを有する実体的信号処理装置として構成して、リアルタイムで学習条件に応じた信号処理をするようにしたニューラルネットを提供するものである。

【0022】

【実施例】本発明になるニューラルネットによる波形等化装置及びその設計方法の一実施例を以下図面と共に詳細に説明する。なお、本波形等化装置WEは、図3に示すような実体的な信号処理装置であり、図4（C）に示すように、記録媒体（または伝送系）Mにより記録・伝送されたデジタル信号を再生・受信する場合に使用され、再生（受信）装置Dからの再生信号（波形劣化したデジタル信号）を波形等化して出力するものである。そして、その設計方法は図4（A）～（C）に示す手法によるものである。

【0023】（ニューラルネットNによる波形等化処理の基本概念）最初に、ニューラルネットによる波形等化装置及びその設計方法の基本概念であるニューラルネットNによる波形等化処理について説明する。図1はニューラルネット（ニューラルネットワーク）による波形等化処理（信号処理）の概念図である。

【0024】同図に示すように、ニューラルネットによる波形等化処理においては、入力信号（再生装置Dからの波形劣化したデジタル信号）は、直列に接続された遅延手段DLによって所定の遅延時間が与えられて、時間的に前後する複数の入力信号（値）がニューラルネットNに入力されるように構成されている。

【0025】ニューラルネットNは、例えばバックプロパゲーション(back propagation)を学習アルゴリズムとする層状（例えば入力層、中間層〔隠れ層〕、出力層の3層）のニューラルネットであり、可変の重みWで結ばれた多数のユニット（ニューロン、シナプスとも称される）の結合（体）である。ユニットUは非線形の入出力特性を有する変換系であり、ユニットUには前層からの出力値に独立した重みWが乗算して得られた前層からの総和が入力され、この総和が非線形変換されて後層に出力されている。

【0026】ニューラルネットNは、（既知の）入力信号に対して出力された出力信号が教師信号と比較されてユニット間の結合の強さを表わす可変の重みWが変化・収束され、すなわち学習され、所望のニューラルネットが構築されて波形等化機能を有するようになる。すなわち、ニューラルネットNからは、略2値データ化されたデジタル信号が最終出力される。

【0027】（ニューラルネットNとユニットUの構成）次に、ニューラルネットNとユニットUについて詳述する。図1に示したニューラルネットNは、前述したように、多数のユニット（U）によりなる入力層、中間

9

して中間層のユニットへ入力されている。

【0037】ユニットへの入力値としては、前層である入力層の出力値が、独立した固定の重みとして機能する抵抗 R_{ji} ($R_{11}, R_{21}, R_{31}, R_{41}, R_{51}, R_{12}, R_{22}, R_{32}, R_{42}, R_{52}, R_{13}, R_{23}, R_{33}, R_{43}, R_{53}$) を介して重み付けされた後に、中間層のユニット $U(2,1) \sim U(2,3)$ を構成するオペアンプ $1a \cdot 1b, 2a \cdot 2b, 3a \cdot 3b$ の反転入力端子に入力され、加算合成されている。なお、オペアンプの非反転入力端子は接地されている。オペアンプより（反転または再反転）増幅された入力値は、ダイオード対 $10, 11, 12$ により非線形変換されて後層である出力層に出力されている。ダイオード対は、前記図5に示したような非線形な入出力特性を有するので、非線形変換がなされて出力されることとなる。

【0038】出力層のユニット $U(3,1)$ であるオペアンプ $4a$ （及び $4b$ ）、ダイオード対 13 には、前記中間層からの出力が抵抗 R_j (R_1, R_2, R_3) を介して入力され、前述した中間層のユニットと同様に、非線形変換されて出力信号（すなわち、波形等化されたデジタル信号）として出力される。

【0039】（ニューラルネットによる波形等化装置の設計方法）次に、ニューラルネットによる波形等化装置の設計方法（ワークステーションによるソフトウェア的実行部分）を説明する。なお、この設計方法が対象とする波形等化装置（WE）は、前記図3で説明した回路である。ニューラルネットによる波形等化装置の設計方法とは、図4（A）～（C）に示す手法によって、波形等化装置WEの抵抗 R_{ji}, R_j ($R_{11}, R_{21}, R_{31}, R_{41}, R_{51}, R_{12}, R_{22}, R_{32}, R_{42}, R_{52}, R_{13}, R_{23}, R_{33}, R_{43}, R_{53}, R_1, R_2, R_3$) の値（固定の重み）を、この波形等化装置WEと等価なニューラルネット（図1に示したニューラルネットN）の学習により得られた重み $W(2, i, j), W(3, 1, j)$ により、すなわち、学習により変化・収束した可変の重みにより具体的に決定することである。なお、ユニット間の結合の強さを表す重みは、前述したように正負の値を有するが、負の重みに対しては前記反転型オペアンプを単独で使用して信号を反転させ、正の重みに対しては2つの反転型オペアンプを直列に使用して信号を再反転させて対応させている。

【0040】図4（A）に示すように、再生装置Dにより再生された記録媒体 M_0 からの再生信号は、A/D変換されてデジタルメモリ20に所定のサンプリング周期で取り込まれる。記録媒体 M_0 には、学習時に利用される既知のデジタルデータが予め記録されている。デジタルメモリ20に取り込まれたデータは、学習処理用のワークステーション21に転送され、後述する学習演算処理がなされる。サンプリング周期は、学習演算処理の間隔（後述するようには例えばデータの1周期 T の半分の時間間隔 $T/2$ ）に等しいか、または学習演算処理の間隔よりも短くしてある。

10

【0041】この時、再生信号は、ビットPLL（フェーズロックループ）回路22にも入力されて再生信号（デジタルデータ）のクロックが抽出されている。抽出されたクロックは選倍回路23で、サンプリング周期に対応するように選倍され、位相回路24で位相調整された後に、前記デジタルメモリ20のサンプリングクロックとして入力されている。

【0042】このように、サンプリング周期の位相は、記録時と等しい理想的な位相ではなく、再生装置Dによって再生された現実の信号の位相に合わせている。したがって、この取り込みデータをもとにしたワークステーション21による後述する学習演算処理は、再生装置Dによって再生された現実の信号の位相（タイミング）に合わせてなされることとなり、すなわちニューラルネットは現実的な条件下で学習することとなり、結果的に精度の良い波形等化がなされる。

【0043】次に、図4（B）に示すように、ワークステーション21によって学習演算処理がなされる。ワークステーション21内には、公知のバックプロパゲーションによる学習アルゴリズムを有するニューラルネットのシミュレーションプログラムが準備され、前記した図3に示す具体的な（ニューラルネットによる）波形等化装置WEと等価である図1に示すニューラルネットNに対して学習演算処理が実行される。

【0044】すなわち、前記再生装置Dによって再生されデジタルメモリ20に取り込まれてワークステーション21に転送された取り込みデータは、波形等化装置WEと等価であるニューラルネットに入力され、この入力信号は入力層→中間層→出力層で伝達・演算処理され、出力層から出力信号が出力される。この出力信号は、それまでの学習によって得られた重みにもとづくものである。演算算出された出力信号は、教師信号（記録媒体 M_0 に予め記録されている既知のデジタルデータをもととする教師データ）と比較され、出力層→中間層→入力層の順で伝達・演算処理され、後述する図6（A）～（C）に示すように学習がなされる。

【0045】学習とは、実際の出力値（出力信号）と望ましい出力値（教師信号）との差を減らすように、ニューラルネットユニット間の結合の強さである重み（係数）を可変して収束させることである。

【0046】学習させる（学習される）伝送再生系の特性とは、データ自体の特性、記録装置の特性、再生装置の特性、伝送ラインの特性などがあり、ニューラルネットの大きさに応じて、適宜選択する。つまり、前記再生装置Dによって再生されサンプリングされる取り込みデータとして、種々の条件、例えば、内容の異なるデータ、異なる記録装置により記録された記録媒体からの再生データ、組立調整状態の異なる再生装置（実際には、再生装置を正常な状態から調整ずれの状態とする）による再生データなどを使用する。このような種々の取り込み

データをもとにして、所望の正解率（性能）が得られるまで前述した学習を繰り返して、ニューラルネットNのユニット間の結合の強さを表す重みを可変する。そして、伝送再生系の特性を学習して収束したニューラルネットNの重みが、波形等化装置WEの抵抗 R_{ji} 、 R_j （ R_{11} , R_{21} , R_{31} , R_{41} , R_{51} , R_{12} , R_{22} , R_{32} , R_{42} , R_{52} , R_{13} , R_{23} , R_{33} , R_{43} , R_{53} , R_1 , R_2 , R_3 ）の値として、決定される。ニューラルネットの学習方法については、後に詳述する。

【0047】最後に、図4（C）に示すように、具体的に決定された抵抗値及び反転型オペアンプの有無に基づいて、波形等化装置WEが製作されて、再生装置Dで再生された一般的な記録媒体Mからの再生信号が波形等化されて出力される。

【0048】（ニューラルネットの学習方法）次に、前記した波形等化装置の設計方法におけるニューラルネットの学習について詳述する。本設計方法では学習のタイミング（周期）、すなわち、学習に用いる取り込みデータのサンプリング点を最適化すると共に、バックプロパゲーションによる学習として教師信号に最終的なデジタル出力値である「0」「1」以外の中間的な値を用いて、学習効果を高めている。図6（A）～（C）は学習過程を説明する図である。

【0049】学習時、図6（B）及び（C）に示すように、学習は例えばデータの1周期Tの半分の時間間隔（周期T/2）で実行される。前述したように、前記デジタルメモリ20によるサンプリング周期の位相は、記録時と等しい理想的な位相ではなく、再生装置Dによって再生された現実の信号の位相に合わせている。よって、この取り込みデータをもとにしたワークステーション21による学習演算処理は、再生装置Dによって再生された現実の信号の位相に合わせてなされる。すなわちニューラルネットは現実的な条件下で学習することとなり、学習効果が良く、これをもとにした波形等化装置では精度の良い波形等化がなされる。

【0050】また、学習時、図6（B）及び（C）に示すように、教師信号としてはデジタルデータ0に対応する値（信号電圧値）「0」及びデジタルデータ1に対応する値（信号電圧値）「1」以外の値として、中間値、例えば「0.5」を用いている。前述したように、前記デジタルメモリ20によるサンプリング周期は、学習の間隔に等しいか短くしてあり、また、学習の間隔はデータの1周期Tより短く、例えば、の半分の時間間隔（周期T/2）とされている。そして、データの反転時の間の学習点では教師信号を「0.5」としている。

【0051】教師信号「0.5」の時では、出力信号が両極端の2値である「0」「1」ではなく、この中間値「0.5」との差を減らすように、結合の強さである重みを変化・収束させて学習するので、ニューラルネット内に連想記憶がスムーズなり、効率良く学習がなされる。

【0052】（ニューラルネットへの入力信号）上述したように、ニューラルネットによる波形等化においては、入力信号（再生装置Dからの波形劣化したデジタル信号）は遅延手段DL（ディレイライン9, 10, 11, 12）によって所定の遅延時間が与えられて、時間的に前後する複数の入力波形（値）がニューラルネットに入力されている。このように、入力波形の時間的変化を入力して、ニューラルネットが波形の特徴を捕まえやすく、符号間干渉の原因を認識・連想して学習しやすくしているのも、簡易な構成で、しかも精度の良い波形等化がなされることとなる。

【0053】（ニューラルネットの最終ユニットへの入力信号）また、前記したニューラルネットによる波形等化装置の設計方法を実施した結果、ニューラルネットの最終ユニット（出力層）への複数の入力信号中に、実質的に極性が逆である信号が含まれる場合では、波形等化装置としての性能が良好であった。これは、最終ユニット（出力層）への複数の入力信号中に、実質的に極性が逆である信号が含まれることにより、最終ユニットへの信号では加算でなく差分となり、高域周波数が改善されてうまい学習が可能となって、性能が向上するためである。

【0054】前述した図3の例では、中間層から出力層のユニットへの3つ出力信号がすべて同極なので、極性が逆である信号を含ませるように、3つの信号に対する重みに対応する係数（これは抵抗 R_j による）中、1個の係数の極性を他2個の極性と実質的に逆とすべく、反転型オペアンプ4bで信号を反転させている。なお、図示しないが、中間層以前での係数関係により中間層から出力層のユニットへの（3つの）出力信号が実質的に同極でない場合では、（3つの）出力信号に対する重みに対応する係数中、1個の係数の極性を他2個の極性と逆にする必要はなく、図3のように反転型オペアンプで反転させる必要はない。

【0055】（ニューラルネットを構成する非線形の変換系）前記した図3及び図5で詳述したように、非線形の変換系をダイオード・クリップ回路により、異なる線形特性を有する3つの入出力領域E1, E2, E3から構成したので、回路が極めて簡易で実現が容易であり、かつ、学習演算処理も簡単で効率も良い。

【0056】（具体的実験例）前記した図4（A）～（C）に示す設計方法にもとづいて、図3に示すニューラルネットによる波形等化装置WEを製作した。図7（A）は本波形等化装置による波形等化の結果を示す波形写真、図（8）（A）はタイム・インターバル・アナライザ（Time Interval Analyzer）による等化波形の分析結果を示す図である。

【0057】（ア）条件

a. 記録媒体

記録媒体としては、市販のCD（Compact Disk）の2.8

13

倍の記録密度（トラックピッチは 0.95μ で1.68倍の密度、線方向は1.67倍の密度）、線速度は 2.5m/s （CDの約2倍速）で、光学的に記録した。

b. 再生装置

光学ピックアップを使用した光学的再生装置

レーザー波長 $\lambda = 670\text{nm}$ 、レンズNA = 0.6

c. ニューラルネットの学習条件

光学系のデ・フォーカス（ピンボケ）、ラジアル方向正負のコマ収差・タンジェンシャル方向正負のコマ収差の4収差をバックプロパゲーションによって全て学習させた。

【0058】(イ) 比較例

図7(B)は図9に示した従来の波形等化装置による波形等化の結果を示す波形写真、図8(B)は従来の波形等化装置による等化波形の分析結果を示す図、図7(C)は波形等化をしていない再生信号を示す波形写真、図8(C)は波形等化をしていない再生信号の分析結果を示す図である。

【0059】(ウ) 比較結果

各装置に、タンジェンシャル正方向の収差を有する再生信号を入力して波形等化の性能を比較した。

【0060】図7(A)～(C)から明らかなように、本波形等化装置WEによれば、再生信号の符号間干渉が除去されて、劣化のないアイパターンが得られる。また、図8(A)～(C)から明らかなように、タイム・インターバル・アナライザー（Time Interval Analyzer）による等化波形の分析結果（タイムベース 1ns 、サンプル数 10^5 ）においても、本波形等化装置WEによれば、データビットが略等間隔で、かつ、明確に分離されており、ジッタ標準偏差SDも小さく、極めて良好な結果が得られた。

【0061】このように、本波形等化装置によれば、従来対応出来なかった種々の光学的収差に起因し、多種多様な符号間干渉により劣化したデジタル信号を正しく再生することができる。また、その設計方法もニューラルネットによるので簡易、かつ、確実である。

【0062】

【発明の効果】以上詳述したように、本発明になるニューラルネットによる波形等化装置は、伝送再生系からの劣化したデジタル信号を遅延させる手段と、非線形の入出力特性を有する複数の変換系が独立した固定の重みで結ばれ、かつ、この固定の重みはニューラルネットにより前記伝送再生系の特性に対して予め学習された重みである変換手段とからなり、時間的に前後させた前記デジタル信号を前記変換手段に入力し、前記伝送再生系の特性に応じて、前記劣化したデジタル信号を波形等化して出力するようにしたものであるから、簡易な構成で、かつ、高速な信号処理が可能となる。したがって、デジタル信号を記録再生・伝送する際に生じた信号劣化を、分析的にリアルタイムで除去して再生することができ、従

14

来の波形等化装置では得られなかった性能が提供される。

【0063】また、本波形等化装置は入力波形の時間的変化をニューラルネットに入力するようにしたので、ニューラルネットが波形の特徴を捕まえやすく、符号間干渉の原因を認識・連想して学習しやすくなり、簡易な構成で、しかも精度の良い波形等化がなされる。

【0064】本発明になるニューラルネットによる波形等化装置の設計方法は、伝送再生系からの劣化したデジタル信号を遅延させる手段と、非線形の入出力特性を有する複数の変換系が独立した固定の重みで結ばれた変換手段とからなり、前記伝送再生系からの劣化したデジタル信号を波形等化して出力する波形等化装置の設計方法であって、前記波形等化装置と等価で、かつ、非線形の入出力特性を有する複数の変換系が独立した可変の重みで結ばれたニューラルネットにより、前記伝送再生系の特性に応じた前記重みを学習させて、前記学習された重みをもとに前記変換手段の固定の重みを設計決定するようにしたものであるから、伝送再生系に応じた波形等化装置（固定の重み）の具体的な設計決定が、極めて容易で、かつ、確実である。したがって、種々の光学的収差に起因し、多種多様な符号間干渉により劣化したデジタル信号を正しく再生する波形等化装置を設計することができる。

【0065】さらに、前記ニューラルネットを層状にすると共に、このニューラルネットの出力層を構成する変換系では、前層から入力される複数の信号中に、極性の異なる信号が含まれるようにしたニューラルネットによる波形等化装置では、出力層（最終ユニット）への信号が差分となるので、高域周波数が改善されてうまい学習が可能となり、高性能な波形等化装置となる。

【0066】また、前記非線形の入出力特性を有する変換系として、非線形の特性を有する半導体素子（例えば、ダイオード対）を用いたニューラルネットによる波形等化装置では、極めて簡易な構成で非線形の入出力特性を有する変換系が得られるので、波形等化装置を簡易な構成で安価に製作できる。

【0067】さらに、前記非線形の入出力特性を有する変換系として、異なる線形特性を有する複数の入出力領域から構成された非線形の変換系を用いたニューラルネットによる波形等化装置では、変換系として動作する回路が極めて簡易で実現が容易であり、かつ、学習演算処理も簡単で効率も良い。

【0068】また、ニューラルネットによる波形等化装置の設計方法として、前記伝送再生系の特性に応じた前記重みの学習に際して、教師信号としては、出力されるべきデジタル信号の2値とこの2値の中間の値とを用いたものでは、中間の値との差を減らすようにも、結合の強さである重みを変化・収束させて学習し、ニューラルネット内に連想記憶がスムーズとなり効率良く学習がな

るので、高性能な波形等化装置を容易に設計できる。

【0069】さらに、ニューラルネットによる波形等化装置の設計方法として、前記伝送再生系の特性に応じた前記重みの学習に際して、前記伝送再生系から実際に再生されたデジタル信号の位相に同期するタイミングで学習するようにしたものでは、学習は、伝送再生系からの現実の信号の位相（タイミング）に合わせてなされることとなり、すなわちニューラルネットは現実的な条件下で学習することとなるので、高性能な波形等化装置を容易に設計できる。

【0070】また、本発明になるニューラルネットは、非線形の入出力特性を有する複数の変換系が独立した重みで結ばれた結合体であり、被学習条件に対応した信号処理を実行するニューラルネットにおいて、学習及びこれに付随する学習中の信号処理については、可変の重みを有するニューラルネットに対して計算機上のシミュレーション動作により実行して、被学習条件に対応した前記可変の重みを学習させ、学習後の所望の信号処理については、前記ニューラルネットと等価で、前記学習により学習された重みをもとに決定された固定の重みを有する実体的信号処理装置として構成して、リアルタイムで学習条件に応じた信号処理をするようにしたものであるから、学習動作は効率的に行なわれて良い学習結果が得られる、一方、所望の処理をする実体的信号処理装置は、簡易であり、かつ、高速な処理が可能である。したがって、このニューラルネットを利用して、磁気記録再生系や光学記録再生系の特性などを学習させ、伝送再生系からの劣化したデジタル信号をリアルタイムで波形等化して出力させることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明になるニューラルネットによる波形等化の一実施例を示す基本概念図である。

【図2】図1に示したニューラルネットワークのユニット結合を示す図である。

【図3】ニューラルネットによる波形等化装置の具体的な回路図であり、ハードウェア的実行をする実体的信号装置の一例を示すものである。

【図4】ニューラルネットによる波形等化装置の設計方法を示す図であり、ソフトウェア的実行を説明するものである。

【図5】ダイオード対による非線形な入出力特性を示す図である。

【図6】ニューラルネットによる波形等化装置の設計時における学習過程を説明する図である。

【図7】(A)は本波形等化装置による波形等化の結果を示す波形写真、(B)は図9に示した従来の波形等化装置による波形等化の結果を示す波形写真、(C)は波形等化をしていない再生信号を示す波形写真である。

【図8】(A)は本波形等化装置による等化波形の分析結果を示す図、(B)は図9に示した従来の波形等化装置による等化波形の分析結果を示す図、(C)は波形等化をしていない再生信号の分析結果を示す図である。

【図9】従来の波形等化装置示す構成図である。

【図10】磁気記録再生系に発生する信号劣化の状態を示すものである。

【図11】光学記録再生系に発生する信号劣化の状態を示すものである。

【符号の説明】

WE 波形等化装置

Mo 既知の記録媒体（伝送系）

M 記録媒体（伝送系）

D 再生（受信）装置

DL 遅延手段

N ニューラルネット

U ユニット

W 可変の重み

WE 波形等化装置

T データの1周期時間

1 a・1 b, 2 a・2 b, 3 a・3 b, 4 a・4 b 反転型オペアンプ

10, 11, 12, 13 ダイオード対

14, 15, 16, 17 ディレイライン

20 デジタルメモリ

21 ワークステーション

22 ビットPLL回路

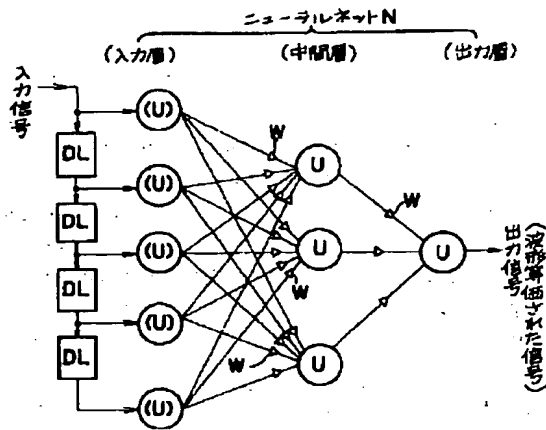
R11, R21, R31, R41, R51 中間層の第1ユニットへの抵抗（固定の重み）

R12, R22, R32, R42, R52 中間層の第2ユニットへの抵抗（固定の重み）

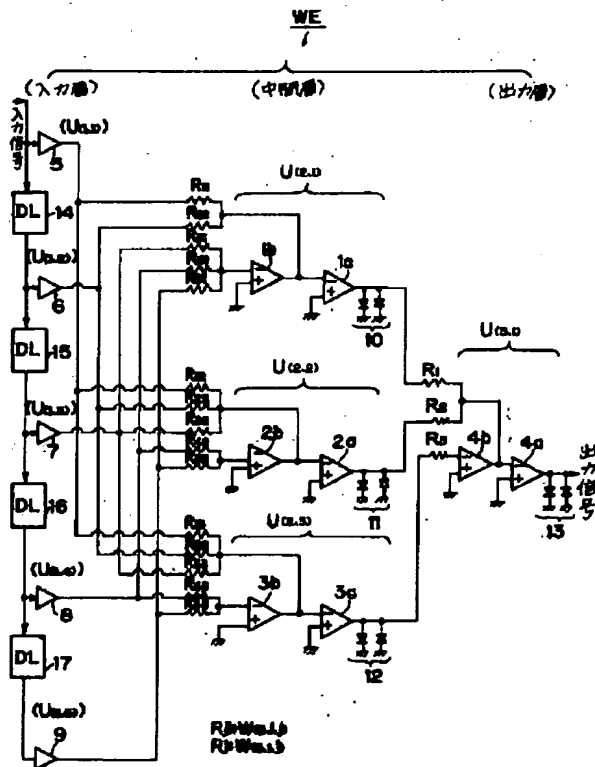
R13, R23, R33, R43, R53 中間層の第3ユニットへの抵抗（固定の重み）

40 R1, R2, R3 最終層（のユニット）への抵抗（固定の重み）

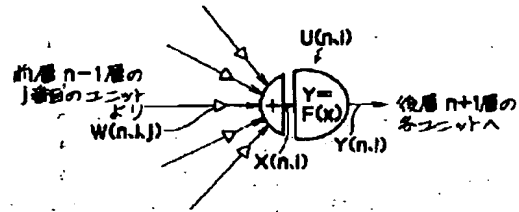
【図1】



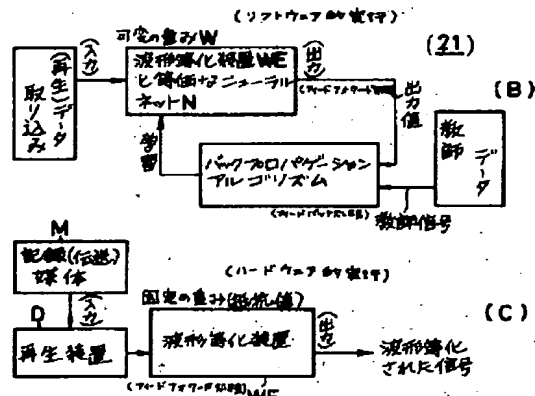
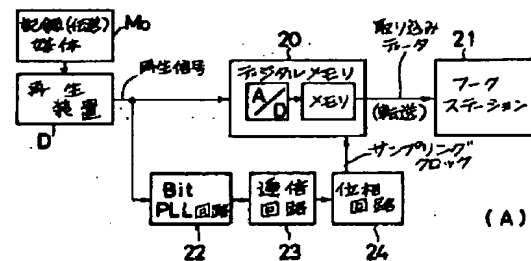
【図3】



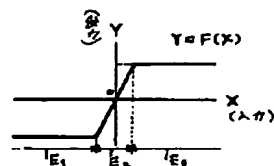
【図2】



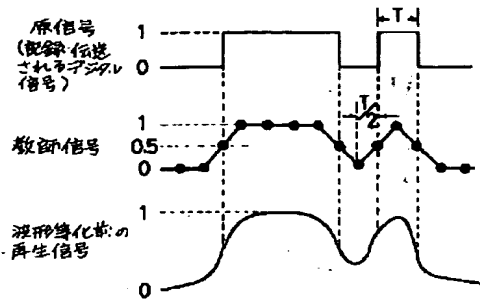
【図4】



【図5】



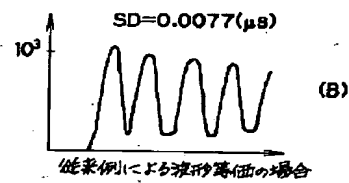
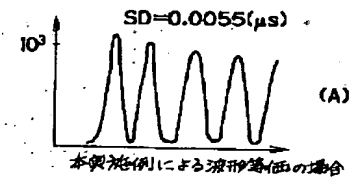
【図6】



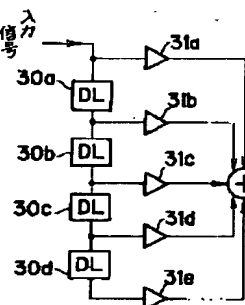
【図7】



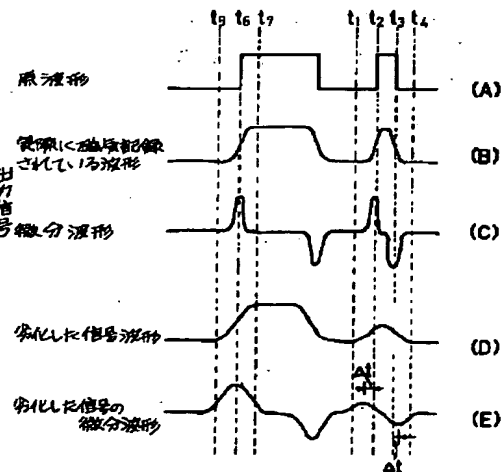
【図8】



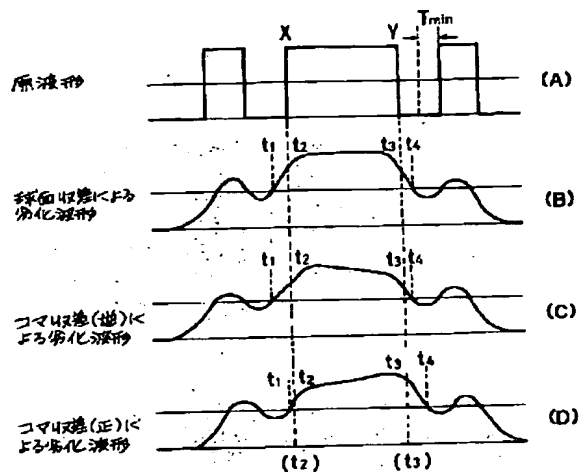
【図9】



【図10】



【図11】



【手続補正書】

【提出日】平成4年3月18日

【手続補正1】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0028

【補正方法】変更

【補正内容】

【0028】ユニットUは脳のニューロンを工学的にモデル化した非線形な入出力特性を有する変換系であり、ニューラルネットNは可変の重みWで結ばれた多数のユニットの結合（体）である。図2は、図1に示したニューラルネットのユニット結合を示す図である。ユニットUは非線形の入出力特性、例えば入力値Xに対して出力値 $Y = F(X)$ を出力する非線形関数 $F(X)$ により構成された変換系である。入力値としては、前層の出力値（あるいはニューラルネットへの入力値）に、独立した可変の重みWが乗算して得られた総和が入力されており、この入力値が非線形変換されて後層に出力されている。なお、ニューラルネットNの各ユニットUに、直流バイアス値を（可変の重みWを介して）入力しても良い。この直流バイアスの最適値も後述する学習で決定される。

【手続補正2】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0037

【補正方法】変更

【補正内容】

【0037】ユニットへの入力値としては、前層である入力層の出力値が、独立した固定の重みとして機能する抵抗 R_{ji} （ R_{11} , R_{21} , R_{31} , R_{41} , R_{51} , R_{12} , R_{22} , R_{32} , R_{42} , R_{52} , R_{13} , R_{23} , R_{33} , R_{43} , R_{53} ）を介して重み付けされた後に、中間層のユニットU（2, 1）～U（2, 3）を構成するオペアンプ1a・1b, 2a・2b, 3a・3bの反転入力端子に入力され、加算合成されている。なお、オペアンプの非反転入力端子は接地されている。オペアンプより（反転または再反転）増幅された入力値は、ダイオード対10, 11, 12により非線形変換されて後層である出力層に出力されている。ダイオード対は、前記図5に示したような非線形な入出力特性を有するので、非線形変換がなされて出力されることとなる。なお、ユニットに直流バイアス値を入力する場合には、学習で決定された固定の直流値を有する独立した直流電圧源（図示せず）を設けて、この直流電圧源とユニット（中間層、出力層）の入力とを、学習で決定された固定の重みとして機能する抵抗を介して接続すれば良い。

3, R_{23} , R_{33} , R_{43} , R_{53} ）を介して重み付けされた後に、中間層のユニットU（2, 1）～U（2, 3）を構成するオペアンプ1a・1b, 2a・2b, 3a・3bの反転入力端子に入力され、加算合成されている。なお、オペアンプの非反転入力端子は接地されている。オペアンプより（反転または再反転）増幅された入力値は、ダイオード対10, 11, 12により非線形変換されて後層である出力層に出力されている。ダイオード対は、前記図5に示したような非線形な入出力特性を有するので、非線形変換がなされて出力されることとなる。なお、ユニットに直流バイアス値を入力する場合には、学習で決定された固定の直流値を有する独立した直流電圧源（図示せず）を設けて、この直流電圧源とユニット（中間層、出力層）の入力とを、学習で決定された固定の重みとして機能する抵抗を介して接続すれば良い。

【手続補正3】

【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】0051

【補正方法】変更

【補正内容】

【0051】教師信号「0.5」の時では、出力信号が両極端の2値である「0」「1」ではなく、この中間値「0.5」との差を減らすように、結合の強さである重みを変化・収束させて学習するので、ニューラルネット内の連想記憶がスムーズになり、効率良く学習される。なお、教師信号とする中間値は「0.5」の値に限るわけではなく、もっと多値にしても良く、同時に補間する数をもっと多数にしても良い。また、後述する具体例のように、記録媒体としてCD（Compact Disc）

k) を用いてCDからの再生信号を波形等化する場合では、CDの記録（カッティング）に用いた矩形波形状のデジタル信号をFIRフィルタによって処理して、再生

装置の光学ピックアップから得られるように信号を丸くして教師信号を作成すれば、学習がよりスムーズに進む。

Waveform equalizer apparatus formed of neural network, and method of designing same.Patent Number: ☐ EP0498574, B1

Publication date: 1992-08-12

Inventor(s): TAKAHASHI SUSUMU (JP)

Applicant(s):: VICTOR COMPANY OF JAPAN (JP)

Requested Patent: ☒ JP4246906


Application

Number: EP19920300838 19920131

Priority Number(s): JP19910031952 19910131

IPC Classification: G06F15/80 ; G11B20/10 ; G11B20/22 ; H03H21/00 ; H04L25/03

EC Classification: G11B20/10A, G06N3/063, G11B7/00M, G11B20/22, H04L25/03B5, G11B5/035, G11B5/09Equivalents: DE69220974D, DE69220974T, JP2797035B2, ☐ US5361327**Abstract**

A waveform equalizer for reducing distortion of a digital signal produced from a digital data recording and playback system or transmission system is formed of a neural network having fixed weighting coefficients. Respective values for the coefficients are established by generating a corresponding simulated neuron network, by software implementation using a computer, and by executing a neuron network learning operation using input values obtained from a distorted digital signal and teaching values obtained from an original digital signal which resulted in the distorted digital signal. 

Data supplied from the esp@cenet database - I2